УДК 539.125.5

# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ В РАЗМНОЖАЮЩИХ СРЕДАХ

А.Ф. Лавренюк, О.В. Селиваникова

Томский политехнический университет
E-mail: sov@phtd.tpu.ru

*Рассмотрены особенности применения нейросетевых вычислительных структур для решения задач переноса нейтронов в размножающих средах. Приведены принципы построения нейросетевых алгоритмов и схемы нейросетевых структур для этого класса задач на основе сеточно-лучевых моделей переноса нейтронов и построения на их основе нейросетевых процессоров с сеточно-лучевой структурой.*

## Введение

Процессы переноса нейтронов в ядерных реакторах определяют режимы работы этих установок и их поведение при различных возмущениях [1–3]. Задачи изучения процессов переноса нейтронов и распределения нейтронных потоков в реакторах всегда остаются актуальными, особенно, при исследовании пространственного распределения энерговыделения в ядерных реакторах и прогнозировании их поведения [4].

При решении задач процессов переноса нейтронов используют два приближения, в которых учитываются особенности анизотропного и изотропного процессов, для которых определяются распределения нейтронов:

- транспортное (пространственно-угловое);
- диффузионное (пространственное).

Для первого класса задач переноса нейтронов применяют математические модели, представленные интегро-дифференциальными уравнениями, для второго – математические модели, представленные дифференциальными уравнениями в частных производных [1–3].

Для задач переноса нейтронов в диффузионном приближении разработан достаточно хороший аппарат решения этих уравнений, и на его основе создан значительный набор программных приложений [2, 4]. Решение задач переноса нейтронов в транспортном приближении имеет свои особенности, которые заключаются в том, что приходится решать задачи переноса нейтронов в многомерном фазовом пространстве – с учетом и пространственных координат, и лучевых направляющих переноса, и фазовых переменных энергетических переходов. Учет этих факторов приводит к необходимости построения математических моделей, выраженных значительным количеством уравнений, что существенно усложняет решаемые задачи и требует применения соответствующих методов их решения [4,55]. Даже при переходе к упрощенным моделям процессов переноса нейтронов остается достаточно проблем при численном решении этих уравнений [5, 6].

## 1. Математические модели процессов переноса нейтронов

Наиболее общим модельным представлением процессов переноса нейтронов в размножающих нейтроны средах является уравнение, описывающее поведение совокупности (ансамбля) нейтронов в многомерном фазовом пространстве, обычно называемое «кинетическим уравнением Больцмана» [1, 2]

$$\frac{1}{\upsilon}\frac{\partial\varphi(\mathrm{r},E,\Omega,t)}{\partial t} = -\Omega\nabla\varphi(\mathrm{r},E,\Omega,t) - \\ -\Sigma(\mathrm{r},E)\varphi(\mathrm{r},E,\Omega,t) + \\ +\int dE'\int d\Omega'\varphi(\mathrm{r},E',\Omega',t)\Sigma_{si}(\mathrm{r},E')W(\mathrm{r},E',\Omega'\to E,\Omega) + \\ +\frac{1}{4}\int dE'\nu\varphi(\mathrm{r},E',E)\Sigma_f(\mathrm{r},E)\int d\Omega'\varphi(\mathrm{r},E',\Omega',t) + S. \quad (1)$$

Здесь $\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t)=\upsilon\, n(\mathbf{r},E,\Omega,t)$ – плотность потока нейтронов в точке с координатой $\mathbf{r}$ в момент времени $t$ для нейтронов с кинетической энергией $E$, перемещающихся со скоростью $\upsilon$ в направлении орта $\Omega$; функция $\Sigma(\mathbf{r},E)$ – полное макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов, $\Sigma_{si}(\mathbf{r},E)=\Sigma_s+\Sigma_{in}$ – макроскопическое сечение упругого и неупругого рассеяния нейтрона с энергией $E$ в точке $\mathbf{r}$, $\Sigma_f(\mathbf{r},E)$ – макроскопическое сечение деления; $S$ – интенсивность потока нейтронов.

Для более наглядной демонстрации последующих преобразований и операций, ур. (1) представим в следующем операторном виде:

$$\widehat{N}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) = \widehat{M}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) + \hat{L}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t). \quad (2)$$

Можно заметить, что действия операторов в ур. (2) могут быть представлены в следующим виде:

$$\widehat{N}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) = \frac{1}{\upsilon}\frac{\partial\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t)}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\widehat{M}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) = -\Omega\nabla\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t); \quad (4)$$

$$\hat{L}\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) = (\hat{L}_a + \hat{L}_f + \hat{L}_s)\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t). \quad (5)$$

Оператор $\widehat{L}$ расщеплен на операторы $\widehat{L}_a$, $\widehat{L}_f$ и $\widehat{L}_s$, каждый из которых описывает определенные процессы взаимодействия нейтронов с ядрами моделируемой среды.

Оператор $\widehat{L}_a$ описывает процессы перехода нейтронов из элемента фазового объема в результате различных взаимодействий нейтронов со средой:

$$\hat{L}_a\,\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) = -\Sigma(\mathbf{r},E)\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t). \qquad (6)$$

Оператор $\widehat{L}_f$ описывает процессы генерации нейтронов деления и в предположении изотропного распределения нейтронов деления имеет вид

$$\hat{L}_f\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) =$$

$$= \frac{1}{4}\int dE'\nu(\mathbf{r},E',E)\Sigma_f(\mathbf{r},E)\int d\Omega'\varphi(\mathbf{r},E',\Omega',t) + S. \quad (7)$$

Здесь $\int \nu(\mathbf{r},E',E)dE'$ – число нейтронов деления, возникающих в интервале $dE$ при одном акте деления для смеси делящихся нуклидов в точке **r**.

Оператор $\widehat{L}_s$ описывает процессы перехода нейтронов в элемент фазового объема $dEd\Omega$ в точке **r** вследствие рассеяния нейтронов из других элементов фазового объема $dE'd\Omega'$ в той же точке фазового пространства:

$$\hat{L}_s\varphi(\mathbf{r},E,\Omega,t) =$$

$$= \int dE' \int d\Omega'\varphi(\mathbf{r},E',\Omega',t)\Sigma_{si}(\mathbf{r},E')W(\mathbf{r};E',\Omega' \to E,\Omega), (8)$$

где $W(\mathbf{r};E',\Omega'\to E,\Omega)$ – плотность вероятности для упруго- и неупругорассеянных нейтронов совершать переход из состояния движения $(E',\Omega')$ (т.е. с энергией $E'$ и направлением движения $\Omega'$) в состояние $(E,\Omega)$. Для смеси нуклидов функция $W$, называемая также индикатрисой рассеяния, может зависеть от координаты. По определению индикатриса рассеяния $W$ нормирована на единицу

$$\iint W(\mathbf{r};E',\Omega' \to E,\Omega)dEd\Omega = 1. \qquad (9)$$

Обобщенная модель переноса нейтронов в операторном виде (2) и расшифровка операторов (3–8) отражают постановку задачи и описывают распределение нейтронов в сложном для аналитического решения фазовом пространстве.

Решение ур. (2) имеет свои особенности, т.к. такая математическая модель переноса нейтронов представлена в обобщенной форме и учитывает взаимосвязанные процессы в многомерном фазовом пространстве. Для практических приложений обычно эта модель бывает представлена как совокупность сопряженных самостоятельных задач, каждая из которых связана с исследованием определенной составляющей процесса переноса нейтронов. Моделируемые процессы переноса нейтронов, как правило, представлены следующими задачами стационарного распределения нейтронов в размножающих средах:

– термализацией нейтронов (задачи пространственно-энергетического распределения):

$$\widehat{N}_E\Phi(\mathbf{r},\mathrm{E}) = \widehat{\mathrm{M}}_\mathrm{E}\Phi(\mathbf{r},\mathrm{E}) + \hat{L}_E\Phi(\mathbf{r},\mathrm{E}); \qquad (10)$$

– транспортным переносом нейтронов (задачи пространственно-углового распределения):

$$\widehat{N}\varphi(\mathbf{r},\ \Omega) = \widehat{\mathrm{M}}_\Omega\varphi(\mathbf{r},\Omega) + \hat{L}_\Omega\varphi(\mathbf{r},\Omega). \qquad (11)$$

Решение этих задач в виде операторных моделей (10) и (11) имеет свои особенности [5, 6]. Но если эти уравнения преобразовать и решать их в приближенном виде в области дискретных фазовых переменных, то к ним могут быть применены различные численные методы решения, в частности, конечно-разностные методы [5, 6].

Для решения ур. (10) в конечно-разностной постановке могут быть применены стандартные методы конечно-разностной аппроксимации для пространственно-зависимых переменных [4, 6]. К переменным, которые имеют энергетическую зависимость, применяют многогрупповое приближение, когда непрерывный энергетический спектр нейтронов заменяют набором групп нейтронов, имеющих различную энергию [1, 4, 5]. При этом общая схема решения может быть представлена как набор сеточных задач, в каждой из которых моделируется распределение нейтронов одной энергетической группы. Взаимосвязи между сеточными односкоростными задачами устанавливаются в соответствии с энергетическими переходами между моделируемыми энергетическими группами нейтронов.

Такая многогрупповая сеточная модель может быть интерпретирована как полисеточная модель, в которой применены сеточные модели, имитирующие перенос односкоростных нейтронов, и имеются взаимные межузловые связи для моделирования переходов нейтронов между энергетическими группами.

Для решения ур. (11) в конечно-разностной постановке стандартные методы конечно-разностной аппроксимации могут быть применены только для пространственно-зависимых координатных переменных. А переменные, имеющие угловую зависимость, представляются набором лучевых направлений переноса. И тогда общая схема решения может быть представлена как набор сеточных задач, каждая для моделирования переноса по одному из лучевых направлений. Взаимосвязи между сеточными однолучевыми задачами устанавливаются в соответствии с рассеянием нейтронов из одного направления переноса в другое в узловых точках моделируемого сеточного пространства.

Определенный интерес представляет приближенная модель транспортного переноса нейтронов (11), которая может быть интерпретирована как сеточно-лучевая модель переноса излучения. Особенности реализации такой модели в базисе нейросетевых структур на специализированных нейросетевых процессорах с сеточно-лучевой структурой рассмотрены в следующих разделах.

### 2. Особенности и вычислительные возможности нейросетевых структур для решения задач переноса нейтронов

Для оценки возможности применения нейросетевых вычислительных структур (НСВС) для решения задач переноса нейтронов следует рассмотреть

особенности структурной организации нейроподобных вычислительных структур (НПВС) и определить какие вычислительные операции такие вычислительные средства с нетрадиционной структурой могут эффективно выполнять.

Нейроподобные вычислительные структуры представляют собой новый класс высокопроизводительных вычислительных средств, которые имеют морфологическое подобие с реальными нейронными сетями и в которых процессы передачи информационных потоков осуществляются непрерывными и дискретными сигналами в дискретно-непрерывной нейросетевой структуре по распределенным в пространстве каналам связи, а преобразование передаваемой информации осуществляется в нейроподобных узловых модулях, размещенных в узловых точках сетевой структуры.

Для выбора принципов построения НПВС целесообразно рассмотреть структурно-функциональную организацию нейросетевых структур с позиций построения различных моделей формального нейрона, с тем, чтобы сохранить наибольшую преемственность при создании НПВС с достаточной степенью адекватности моделируемым нейронным сетям.

Среди разнообразных типов моделей нейронов [7, 8] наиболее широкое распространение получили простые модели нейронов, так называемые модели формального нейрона. Обычно эти модели представлены в виде трехзвенной структуры, содержащей последовательно соединенные узел конвергенции входных сигналов, узел нелинейной обработки интегрального сигнала и узел дивергенции выходных сигналов. Посредством данных узлов воспроизводятся следующие основные свойства формального нейрона: суммирование входных сигналов, их дискриминация по пороговому уровню и частотно-импульсная модуляция выходного сигнала. Следует заметить, что в модели формального нейрона эти узлы имитируют соответствующие функции дендридов, сомы нейрона и аксона и его терминалей.

Простейшая модель однослойной нейросетевой структуры (НСС), рис. 1, набирается из формальных нейронов, каждый, из которых может быть представлен как нейроподобный элемент (НПЭ), имеющий на входе узел $C$ конвергенции входного сигналов, соединенные узлом $F$ нелинейной обработки интегрального сигнала и узел $D$ дивергенции выходных сигналов. Группа таких НПЭ образует слой, в котором выполняются процедуры, соответствующие преобразованию входных сигналов $x_i$, составляющих вектор входных сигналов $X$, и генерации выходных импульсных сигналов $y_i$, образующих вектор выходных сигналов $Y$.

В такой однослойной нейронной сети (НС) каждый из входов сети связан со входом каждого НПЭ слоевой структуры посредством матрицы связей $W$, в которой весовые коэффициенты связи $\omega_{ij}$ характеризуют связь $i$-ого входа нейронной сети со входом $j$-го формального нейрона. При этом во входных узлах узла конвергенции входного сигнала НПЭ выполняются однотипные процедуры конвергенции входных сигналов $x_i$, "взвешенных" по "весу" $\omega_{ij}$ соответствующего канала связи. В блоке нелинейного преобразования производится нелинейное преобразование (квантование) интегральных сигналов с генерацией на выходе НПЭ импульсных сигналов $y_i$. Получаемый на выходе однослойной НС вектор $Y$ выходных сигналов, фактически является входным вектором для следующего слоя НС.

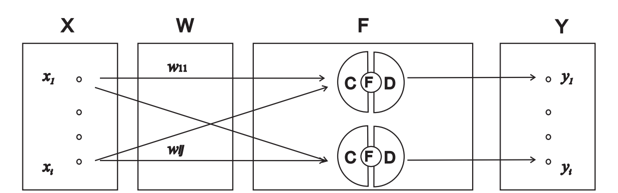



***Рис. 1.*** *Структурная схема моделей однослойной нейронной сети*

Таким образом, в однослойной НС выполняются следующие вычислительные процедуры: матричное умножение входного вектора $X$ на матрицу связей $W$ с последующим суммированием полученных при умножении результатов и преобразованием полученного интегрального сигнала в соответствии с заданной функцией нелинейного преобразования $F$ в вектор выходных сигналов $Y$:

$$Y = F(W \cdot X). \qquad (12)$$

Для однослойных НС с асинхронными процессами передачи и преобразования информационных потоков функция выходного сигнала $y_k$ для $j$-го НПЭ определяется значениями входных сигналов $x_i$, значениями "весов" $\omega_{ij}$ нейросетевых связей и активирующей функцией $f_j$ нелинейного преобразования $j$-го НПЭ:

$$y_k = f_j\left(\sum_i \omega_{ij} x_i\right).$$

Однослойная НС представляет единичный слой нейросетевой структуры обработки информационных потоков. Одним из вариантов технической реализации таких сетей являются оптоэлектронные однослойные НС, состоящие из оптоэлектронных НПЭ, каждым из которых производится обработка вектора $X$ входных оптических сигналов и генерируется вектора $Y$ выходных оптических сигналов, осуществляющих оптическую взаимосвязь НПЭ в нейросети [9].

Методы построения приближенных моделей переноса нейтронов с использованием методов имитационного моделирования в нейросетевом базисе существенно отличаются от традиционных методов построения приближенных математических моделей для такого класса задач.

При применении традиционных методов математического моделирования на типовых вычислительных системах процессы переноса интерпретируются с позиций общепринятых закономерностей и в соответствии с получаемыми при этом физическими моделями производится построение соответствующих им математических моделей и алгоритмов решения [6].

При применении нейросетевых методов моделирования могут быть построены приближенные имитационные модели процессов переноса, при этом производится интерпретация исходного моделируемого процесса переноса простым модельным представлением с использованием структурных схем моделируемого процесса и различных феноменологических моделей и производится «подстройка» вычислительной (моделирующей) структуры под моделируемый процесс [9].

### 3. Нейросетевые алгоритмы для решения задач переноса нейтронов

При разработке и построении нейросетевых алгоритмов решения задач переноса нейтронов следует учитывать лучевые направления переноса нейтронов (пространственно-угловое пространство, или по терминологии Гиббса и Больцмана – $\mu$-пространство [1]), т.к. распределение совокупности ансамбля нейтронов более точно можно описать только с учетом их переноса по лучевым составляющим.

Особенности построения нейросетевых алгоритмов решения задач переноса нейтронов могут быть продемонстрированы (проиллюстрированы) на примере применения этих методов для решения односкоростного линейного интегро-дифференциального уравнения Больцмана (11), которое в операторной форме для стационарного случая в плоско-параллельной геометрии представляется в виде:

$$\widehat{M}_{\mu}\varphi(\mathbf{r},\mu)+\hat{L}\varphi(\mathbf{r},\mu)=\widehat{M}_{s}\varphi(\mathbf{r},\mu). \quad (13)$$

Операторы этой модели $M_\mu$, $L$ и $M_s$ действующие на функцию моделируемой переменной $\varphi(\mathbf{r},\mu)$, представлены соотношениями:

$$\widehat{M}_{\mu}\varphi(\mathbf{r},\mu)=\mu\nabla\varphi(\mathbf{r},\mu);\ \hat{L}\varphi(\mathbf{r},\mu)=\Sigma_t(\mathbf{r})\varphi(\mathbf{r},\mu);$$

$$\widehat{M}_{s}\varphi(\mathbf{r},\mu)=$$

$$=\int_{-1}^{+1}\varphi(\mathbf{r},\mu')\Sigma_s(\mathbf{r})W_s(\mathbf{r},\mu'\to\mu)d\mu'+Q(\mathbf{r},\mu), \quad (14)$$

где $\mu=\cos\Theta$ – единичный вектор в направлении моделируемого переноса; $Q(\mathbf{r},\mu)$ – источник нейтронов.

Оператор $\widehat{M}_s$, представленный интегральным соотношением в (14), описывает конвергенцию потоков нейтронов, рассеянных из различных направлений переноса $\mu'$ в рассматриваемое направление переноса $\mu$.

Функция вероятности рассеяния (индикатриса рассеяния) $W_s(\mu'\to\mu)$ характеризует рассеяние нейтрона после столкновения из одного направления переноса в другое, при этом вероятность того, что нейтрон в результате рассеяния полетит в какомнибудь направлении – событие достоверное, и нормировка функции вероятности рассеяния (9) дает следующее значение:

$$\frac{1}{4}\int_{-1}^{+1}d\mu' W_s(r,\mu'\to\mu)=1. \quad (15)$$

Для некоторых вариантов решение ур. (13) в конечно-разностном приближении на сеточно-лучевых моделях производится посредством расщепления пространственных операторов $\widehat{M}_\mu$ и $\widehat{M}_s$ по пространственно-угловым осям. Для самой простой постановки выбирается четырехлучевая модель переноса, в каждой узловой точке которой пересекаются две пары встречно-параллельных лучей. Вообще число лучевых направлений переноса, пересекающихся в каждой узловой точке такой сеточно-лучевой модели переноса, может быть любым и определяется условиями решаемой задачи и возможностями применяемых вычислительных (моделирующих) средств.

Применяя к расщепленным таким образом пространственным операторам конечно-разностную аппроксимацию, можно осуществить переход к новым узловым переменным $\varphi[i,j,n]$, описывающим узловую функцию нейтронного потока для $n$-го луча из $k$-го числа лучей, пересекающихся в $ij$-х узловых точках моделируемого плоско-параллельного пространства. Последующий переход к безразмерным переменным $u[i,j,n]=m_u\varphi[i,j,n]$ в ур. (13, 14) приводит к следующему виду операторной модели:

$$\breve{M}_{\mu}u[i,j,n]+\breve{L}u[i,j,n]=\breve{M}_{s}u[i,j,k], \quad (16)$$

в которой сеточно-лучевые операторы описываются соотношениями:

$$\breve{M}_{\mu}u[i,j,n]=\nu_{\mu}\frac{\mu_n(u[i,j,n]-u[i-1,j,n])}{\delta r_n};$$

$$\breve{L}u[i,j,n]=\nu_t\Sigma_{t[i,j]}u[i,j,n];$$

$$\breve{M}_{s}u[i,j,n]=$$

$$=\nu_s\sum_k\Sigma_{s[i,j]}u[i,j,k]W_s[i,j,k\to n]\delta\mu_k+Q[i,j,n], \quad (17)$$

где $\nu_\mu$, $\nu_t$, $\nu_s$ – коэффициенты приведения операторов к безразмерному виду; $\mu_n$ – дискретное угловое направление переноса по одному из $n$-х лучей; $\delta r_n$ – шаг пространственной сетки по $n$-му лучу; $\varphi[i,j,n]$ – поток нейтронов, летящих в направлении $\mu_n$ (луч $n$) в $ij$-ой узловой точке моделируемого пространства; $S_{t[i,j]}$ – полное сечение взаимодействия нейтронов в $ij$-ой узловой точке; $S_{s[i,j]}$ – сечение рассеяния нейтронов в $ij$-й узловой точке в другие направления переноса; Ws$[i,j,k\to n]$ – вероятность того, что нейтрон, летящий в направлении луча $\mu_k$, после столкновения в $ij$-ой узловой точке рассеивается в направлении $\mu_n$.

Аналогично соотношениям (15) нормировки дискретной функции рассеяния в $ij$-й узловой точке получено следующее соотношение:

$$\frac{1}{4}\sum_k W_s[i,j,n\to k]\delta\mu_k=1. \quad (18)$$

В уравнениях (17) члены с суммированием по $k$-му числу пересекающихся в $ij$-й точке лучей направлений переноса описывают конвергенцию потока нейтронов, переходящих из лучей с направлением переноса $\mu_k$, в луч с направлением переноса

$\mu_n$, а соотношение нормировки выходных потоков нейтронов (18) описывает дивергенцию потоков нейтронов, переходящих из луча с направлением переноса $\mu_n$ в лучи с направлением $\mu_k$.

Схема узловой точки моделирования переноса в выбранной четырехлучевой модели представлена на рис. 2, где показана *ij*-ая узловая точка пересечения двух пар встречно-параллельных лучей, лучи $\mu_1$ и $\mu_2$ направлены по оси *x* (индекс – *i*), лучи $\mu_3$ и $\mu_4$ направлены по оси *y* (индекс – *j*), стрелками на схеме обозначены направления рассеяния нейтронов из *ij*-й точки, находящейся на одном направлении переноса, в другие направления.

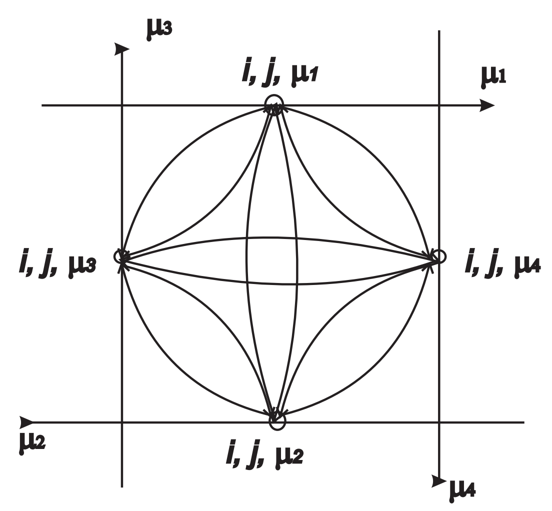



***Рис. 2.*** *Схема ij-го узла сеточно-лучевой модели четырехлучевого встречно-параллельного транспортного переноса нейтронов*

В соответствии с такой схемой модельного представления переноса в *ij*-й узловой точке сеточно-лучевого пространства производится построение структурной схемы нейросетевого процессора, каждый узловой модуль которого выполнен на НПЭ, имеющем, как и в модели НС, узел *C* конвергенции на входе, узел дивергенции *D* на выходе и узел однонаправленной передачи от входного узла к выходному с нелинейным преобразованием передаваемого сигнала. На схеме такого узлового модуля нейросетевой структуры, рис. 3, узлы конвергенции и дивергенции обозначены сегментами, а узел нелинейного преобразования – кружком с двойной стрелкой в центре.

При реализации модели транспортного переноса в базисе НСС предполагается, что в каждом *ij*-м узле сеточно-лучевой модели для каждого из моделируемых угловых направлений переноса применяется НПЭ, в котором на входе моделируется конвергенция нейтронных потоков, входящих в *ij*-й узел моделируемого пространства из других направлений моделируемого переноса, а на выходе моделируется дивергенция нейтронных потоков, выходящих из этой точки и рассеянных из моделируемого направления переноса в другие направления переноса.

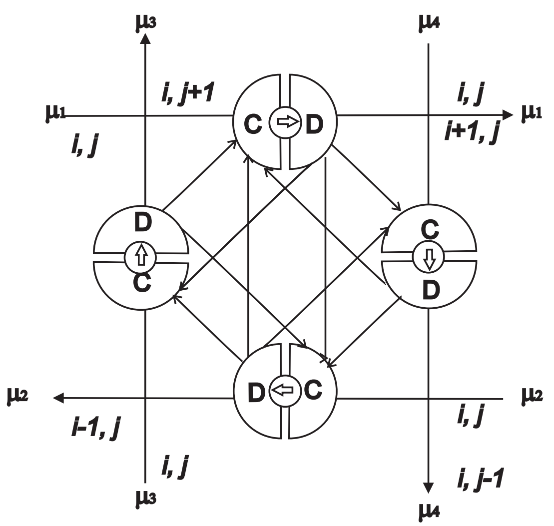



***Рис. 3.*** *Структурная схема ij-го узла нейросетевой модели четырехлучевого встречно-параллельного транспортного переноса нейтронов*

Нейросетевые структуры, применяемые для моделирования процессов переноса нейтронов, состоят из набора узловых элементов нейросетевой модели встречно-параллельного переноса нейтронов, и основные характеристики узловых НПЭ могут быть описаны операторными уравнениями (16).

Сеточно-лучевые операторы в этих уравнениях описываются следующими соотношениями:

$$\breve{M}_\mu u[i,j,n] = v^* g_{\mu n}(u[i,j,n] - u[i-1,j,n]);$$
$$\breve{L}_\mu u[i,j,n] = v^* g_t u[i,j,n];$$
$$\breve{M}_s u[i,j,n] = v^* \sum_k g_{sk} u[i,j,k]. \quad (19)$$

где * – базовый параметр приведения операторов модели к безразмерному виду.

Из сравнения операторов (17) и операторов сеточно-лучевой модели (19) получены следующие условия подобия для моделирования процессов транспортного переноса нейтронов на сеточно-лучевых моделях:

$$g_{\mu n} = \frac{v_\mu}{v^*}\frac{\mu_n}{\delta r_n};\quad g_t = \frac{v_t}{v^*}\Sigma_t;\quad g_{sk} = \frac{v_s}{v^*}\Sigma_s W_s\left[k \to n\right]\delta\mu_k.$$

Характеристики узла конвергенции и их проводимость $g_{\mu n}$ пропорциональна величине углового сегмента $\delta\mu_n$ и обратно пропорциональна шагу пространственной сетки $\delta r_n$. Характеристики рассеяния из других *k*-х направлений переноса в *n*-ое направление переноса, и их проводимость $g_{sk}$ пропорциональны рассеивающим свойствам среды. Характеристики узла нелинейного преобразования *F* подбираются таким образом, чтобы при задании передаточной характеристики этого узла учитывались поглощающие и размножающие свойства среды.

Выполнение моделирующей нейросетевой структуры на оптоэлектронных НПЭ позволяет реализовать однонаправленную передачу оптических сигналов между НПЭ и эффективно моделировать

процессы переноса излучения, с которыми они имеют одну физическую природу [9]. Параллельный ввод и вывод исходных данных и результатов моделирования посредством оптических сигналов позволяет параллельно выполнять операции конвергенции и дивергенции входных и выходных сигналов, а также операции межузловой связи НПЭ с перемножением входных сигналов на вектор весовых коэффициентов связи.

Таким образом, показано, что при решении задач переноса нейтронов с применением нейросетевых структур требуются новые подходы к разработке методов решения и построения на их основе новых алгоритмов, ориентированных на решение такого класса задач на специализированных процессорах. При выборе принципов построения нейросетевых алгоритмов решения задач переноса нейтронов предложены сеточно-лучевые модели переноса нейтронов, и на их основе разработаны сеточно-лучевые нейросетевые процессоры с сеточнолучевой структурой для решения такого класса задач.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**


1. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов / Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1974. – 494 с.
2. Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б. Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1978. – Т. 1. – 397 с.
3. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
4. Вычислительные методы в физике реакторов / Ред. Х. Гринспен и др.; Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1972. – 370 с.
5. Марчук Г.И., Лебедев В.И. Численные методы в теории переноса нейтронов. – М.: Атомиздат, 1971. – 496 с.
6. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 456 с.
7. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – 237 с.
8. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. – М.: Издательское предприятие редакции журнала «Радиотехника», 2000. – 416 с.
9. Лавренюк А.Ф. Основы математического моделирования нейтронно-физических процессов в нейросетевом базисе. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 196 с.


УДК 621.039.5